

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2640>
<https://elibrary.ru/FSGMYE>

Обзорная статья
<https://fptt.ru>

Антипитательные факторы в растительном сырье и пути снижения их содержания



Н. Н. Алёхина^{1,*}, Л. В. Антипова¹, В. Г. Лобанов²,
Е. И. Пономарева¹, В. Н. Нартова¹

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий^{ROR}, Воронеж, Россия

² Кубанский государственный технологический университет^{ROR}, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 03.03.2026

Принята после рецензирования: 06.04.2026

Принята к публикации: 05.05.2026

*e-mail: nadinat@yandex.ru

© Н. Н. Алёхина, Л. В. Антипова, В. Г. Лобанов,
Е. И. Пономарева, В. Н. Нартова, 2026



Аннотация.

Растительное сырье – ключевой источник питательных веществ для человека и животного. Однако пищевая ценность продуктов растительного происхождения ограничена наличием антипитательных веществ (антинутриентов). Цель исследования – собрать и систематизировать современные данные об основных антипитательных веществах, их влиянии на организм человека и эффективных способах снижения уровня таких соединений в пищевых системах растительного происхождения.

Объектами исследования являлись научные статьи российских и зарубежных ученых, находящиеся в открытом доступе. Поиск осуществляли по информационным базам PubMed, eLIBRARY.RU, CyberLeninka и с помощью поисковой системы Google Scholar. Период поиска – с 2021 по 2026 гг. Для систематизации найденной информации использовали методы анализа, сравнения и описания.

В работе проанализированы основные классы антипитательных соединений: ингибиторы ферментов (протеаз и α -амилазы), фитиновая кислота (фитаты), лектины, танины и сапонины. Описаны их химическая природа, источники и двойственная физиологическая роль, связанная с негативным воздействием на биодоступность и усвояемость макро- и микронутриентов, а также с потенциальной пользой для организма (антиоксидантные, противовоспалительные и гипогликемические свойства) в контролируемых концентрациях. Оценена эффективность традиционных способов (замачивание, проращивание, ферментация, термическая обработка) и инновационных технологий (экструзия, обработка ультразвуком, высоким гидростатическим давлением и импульсным электрическим полем) для снижения содержания антинутриентов.

Проведенный анализ традиционных и новых методов показывает необходимость использования комбинированных технологий обработки растительных пищевых систем для эффективного устранения антипитательных факторов и максимального сохранения полезных компонентов как условия повышения их пищевой ценности.

Ключевые слова. Антипитательные вещества, растительное сырье, ингибиторы ферментов, фитаты, лектины, танины, сапонины, обработка, пищевая ценность

Для цитирования: Алёхина Н. Н., Антипова Л. В., Лобанов В. Г., Пономарева Е. И., Нартова В. Н. Антипитательные факторы в растительном сырье и пути снижения их содержания. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 328–341. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2640>

Anti-Nutritional Factors in Plant Raw Materials: Reduction Strategies



Nadezhda N. Alekhina^{1,*}, Ludmila V. Antipova¹,
Vladimir G. Lobanov², Elena I. Ponomareva¹, Valeria N. Nartova¹

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies^{ROR}, Voronezh, Russia

² Kuban State Technological University^{ROR}, Krasnodar, Russia

Received: 03.03.2026

Revised: 06.04.2026

Accepted: 05.05.2026

*e-mail: nadinat@yandex.ru

© N.N. Alekhina, L.V. Antipova, V.G. Lobanov, E.I. Ponomareva,

V.N. Nartova, 2026



Abstract.

Plant raw materials are a key source of nutrients for humans and animals. However, their nutritional value is limited by the presence of anti-nutritional substances (antinutrients). This review systematizes the research on the chemical nature, functions, and reduction methods available for anti-nutritional compounds in food systems of plant origin.

The review covered Russian and foreign scientific articles in the public domain (Google Scholar) registered in PubMed, eLIBRARY.RU, and CyberLeninka in 2021–2026.

Anti-nutritional substances include enzyme inhibitors (proteases and α -amylase), phytic acid (phytates), lectins, tannins, and saponins. The publications under review feature such aspects as their chemical nature, sources, and dual physiological roles, including the negative impact on the bioavailability and digestibility of macro- and micronutrients. Some studies focus on their potential benefits, e.g., antioxidant, anti-inflammatory, and hypoglycemic properties in controlled concentrations. The review includes a comparative analysis of traditional methods (soaking, germination, fermentation, heat treatment) and innovative technologies (extrusion, ultrasound treatment, high hydrostatic pressure, pulsed electric field).

Combined processing technologies prove to be the most effective approach to reducing anti-nutritional factors in plant-based food systems while preserving their beneficial components.

Keywords. Anti-nutritional factors, plant raw materials, enzyme inhibitors, phytates, lectins, tannins, saponins, processing, nutritional value

For citation: Alekhina NN, Antipova LV, Lobanov VG, Ponomareva EI, Nartova VN. Anti-Nutritional Factors in Plant Raw Materials: Reduction Strategies. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):328–341. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2640>

Введение

Растительные пищевые системы – один из основных источников питания в рационе людей и животных. Растительная пища содержит различные биологически активные компоненты, способствующие укреплению здоровья людей, в т. ч. за счет снижения риска развития хронических неинфекционных заболеваний [1].

Основные продовольственные культуры, выращиваемые по всему миру, – злаковые (пшеница, рожь, ячмень, рис, кукуруза, овес, просо, гречиха и др.) и бобовые (горох, фасоль, чечевица, нут, соя и др.). Зернобобовые культуры известны как источники растительного белка (20–37 %), характеризующегося оптимальным набором незаменимых аминокислот, в т. ч. с высокой долей лизина – аминокислоты, дефицитной для злаков. При этом к лимитирующим аминокислотам бобовых относятся серосодержащие – метионин и цистеин. Эти культуры содержат резистентный

и медленно усваиваемый крахмал и отличаются значительным содержанием пищевых волокон, витаминов группы В, минеральных веществ (магния, калия, железа, цинка, фосфора, кальция), а также биоактивных фитохимических веществ, обеспечивая высокую антиоксидантную активность [2, 3]. По результатам исследований известно, что включение зернобобовых в рацион оказывает благоприятные для здоровья физиологические эффекты: предотвращает или замедляет развитие ряда заболеваний, таких как ишемическая болезнь сердца, ожирение и сахарный диабет, благодаря низкому гликемическому индексу [4].

При этом злаки характеризуются небольшим содержанием белка (7–15 %) и высокой долей углеводов, пищевых волокон, витаминов и минеральных веществ. По сравнению с бобовыми злаковые культуры имеют значительное содержание аминокислот метионина и цистеина, которые обладают нутрицевтическими

свойствами, влияющими на снижение риска сердечно-сосудистых заболеваний и возникновения опухолей. Однако пищевая ценность зерновых продуктов зависит от сохранности макро- и микронутриентов исходных частей зерна, причем большинство из них в процессе переработки удаляется. Вместе с тем цельнозерновые ингредиенты, обладая богатым химическим составом, имеют низкую усвояемость, в т. ч. из-за наличия антипитательных веществ [5, 6].

Антипитательные факторы (антинутриенты) представляют собой биоактивные соединения, синтезируемые растениями в качестве вторичных метаболитов для обеспечения биохимической защиты от травоядных животных, воздействия конкурирующих растительных видов и неблагоприятных условий окружающей среды. Антинутриенты оказывают негативное влияние на биодоступность питательных веществ в организме как человека, так и животного. Присутствие этих соединений в продуктах растительного происхождения снижает их пищевую ценность за счет ингибирования процессов переваривания, подавления активности ферментов организма, а также нарушения всасывания и усвоения нутриентов (минералов, белков и витаминов). Тем не менее степень негативного воздействия антинутриентов на биодоступность пищевых компонентов зависит от вида и концентрации этих соединений, способности взаимодействовать с другими веществами и методов обработки пищевых систем [7, 8].

Основные антипитательные соединения, содержащиеся в растительных продуктах, – ингибиторы ферментов, фитиновая кислота, сапонины, танины и лектины. В соответствии с критерием термической стабильности антинутриенты можно классифицировать на две группы: термостабильные (фитиновая кислота, сапонины и конденсированные танины) и термолабильные соединения (ингибиторы ферментов и лектины) [9].

Для снижения содержания антипитательных веществ в растительном сырье применяют различные методы обработки, в т. ч. традиционные способы: очистка и измельчение, термообработка, замачивание, проращивание и ферментация. Применение таких методов, особенно их комбинированное использование, обладает высокой эффективностью в отношении уменьшения количества антинутриентов, но при этом также может приводить к потере важных питательных соединений. В связи с этим актуальны новые способы воздействия, такие как экструзия, облучение, обработка высоким гидростатическим давлением, холодной плазмой, импульсным электрическим полем, микроволновая и ультразвуковая обработка и другие методы, позволяющие сохранить ценные нутриенты продукта и повысить их биодоступность [10].

В последнее время многие исследования указывают на возможное полезное влияние антипитательных соединений в контролируемых концентрациях для организма человека и животного, что подчеркивает неоднозначность их биологически активных свойств [11].

Исходя из этого, цель исследования – собрать и систематизировать современные данные об основных антипитательных веществах, их влиянии на организм человека и эффективных способах снижения уровня таких соединений в пищевых системах растительного происхождения.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись научные статьи российских и зарубежных ученых, находящиеся в открытом доступе и посвященные антипитательным факторам пищевых систем растительного происхождения, а также методам их инактивации. Литературный поиск проводили за период 2021–2026 гг. с использованием информационных баз данных: PubMed (ключевые слова – anti-nutritional factors, legumes, enzyme inhibitors, phytic acid, saponins, tannins, lectins, soaking, germination, fermentation, cooking, extrusion, ultrasound, high pressure, pulsed electric field), eLIBRARY.RU (ключевые слова – антипитательные вещества, бобовые культуры, ингибиторы ферментов, фитаты, танины, сапонины, лектины, замачивание, проращивание, ферментация, термическая обработка, экструзия, ультразвук, высокое давление, импульсное электрическое поле), CyberLeninka (ключевые слова – антипитательные вещества, зернобобовые, ингибиторы ферментов, фитиновая кислота, танины, сапонины, лектины, замачивание, проращивание, ферментация, термическая обработка, экструзия, ультразвук, высокое давление, импульсное электрическое поле) и с помощью поисковой системы Google Scholar.

Для систематизации найденной информации использовали методы анализа, сравнения и описания.

Результаты и их обсуждение

Воздействие антинутриентов на физиологические процессы в питании человека основано, прежде всего, на механизмах хелатирования и комплексообразования, ингибирования активности ферментов и влияния на проницаемость кишечника. Приведем основные виды антипитательных веществ, содержащихся в растительном сырье и продуктах на его основе.

Ингибиторы ферментов. Практически во всех злаках и бобовых культурах присутствуют ингибиторы ферментов, ключевые из которых влияют на активность протеаз и α -амилазы в пищеварительном тракте.

Ингибиторы протеолитических ферментов воздействуют на сериновые протеазы (трипсин и химотрипсин), что приводит к ухудшению переваривания белка и всасывания аминокислот. Эти антинутриенты по своей природе являются белками с низкой молекулярной массой, подавляющими активность пищеварительных ферментов посредством образования межбелковых взаимодействий и блокирования их активного центра [12]. Они делятся на ингибиторы Кунитца (ИК) и ингибиторы Боумана-Бирка (ИББ). ИК представляют собой белок глобулинового типа с молекулярной массой 18–24 кДа и изоэлектри-

ческой точкой при pH 4,5. Его первичная структура включает 170–200 аминокислотных остатков и два дисульфидных мостика. ИББ состоят из 71 аминокислоты, содержат семь дисульфидных связей и имеют два независимых реактивных участка ингибирования за счет наличия структурных N- и C-концевых доменов, блокирующих каталитические центры трипсина и химотрипсина. Соответственно, ИББ могут образовывать как бинарный комплекс с трипсином или химотрипсином, так и тройную структуру с обоими ферментами. ИББ более термоустойчивы по сравнению с ИК, которые при термическом воздействии могут объединяться с другими белковыми молекулами вследствие нековалентных или дисульфидных взаимодействий, что приводит к снижению трипсинингибирующей активности, тогда как структурная целостность ИББ сохраняется [13].

Основные источники ингибиторов протеаз – бобовые культуры, в меньшей степени – злаки (пшеница, ячмень, овес) и картофель. Исследования показывают, что наибольшее содержание ингибитора трипсина наблюдается в сое (46 единиц трипсинингибирующей активности (ТИА/мг)) по сравнению с другими бобовыми – в горохе (3–5 ТИА/мг), чечевице (5–7 ТИА/мг), нуте (14–16 ТИА/мг) и фасоли обыкновенной (15–21 ТИА/мг). Показатели химотрипсинингибирующей активности (ХИА) были наивысшими и в соевых бобах (30 ХИА/мг) по сравнению с фасолью (17–25 ХИА/мг), нутом (11–14 ХИА/мг), чечевицей (3–5 ХИА/мг) и горохом (2–4 ХИА/мг). Содержание ингибиторов протеаз может варьироваться в зависимости от вида и сорта культур [14].

В организме человека ингибиторы, блокируя ферментативную активность протеаз в двенадцатиперстной кишке, способствуют усилению выработки холецистокинина – гормона, стимулирующего выделение ферментов поджелудочной железы и при этом повышающего потребность организма в серосодержащих аминокислотах. Такая реакция регулирует секрецию протеаз, однако подобное воздействие ингибиторов ферментов приводит к гипертрофии и гиперплазии поджелудочной железы. Повышенное содержание ингибиторов протеаз в рационе животных вызывает снижение усвоения азота, общей скорости роста организма, а также биодоступности серосодержащих аминокислот и белков [15]. Положительное действие ингибиторов протеаз связано с их антиканцерогенными свойствами, которые предотвращают возникновение рака толстой кишки и молочных желез. Кроме того, эти антинутриенты могут использоваться при лечении ожирения благодаря способности регулировать аппетит и замедления опорожнения желудка, создавая чувство насыщения [11].

Ингибиторы α -амилазы – термолабильные соединения белковой природы, блокирующие ферментативную активность амилазы за счет межмолекулярных сил, водородных и электростатических взаимодействий.

Наличие и концентрация природных ингибиторов зависят от сорта и анатомической части зерна. Среди злаковых и бобовых культур наибольшее содержание выявлено в различных видах фасоли (особенно белой), а также в оболочках пшеницы, ячменя, ржи, риса, проса и сорго [16].

Ингибирование действия α -амилазы поджелудочной железы способствует снижению степени расщепления крахмала, препятствуя усвоению и всасыванию углеводов в организме человека, что влияет на замедление образования глюкозы и может использоваться для регулирования ее уровня в плазме крови. Таким образом, ингибиторы амилазы могут применяться в лечении людей, страдающих сахарным диабетом или ожирением, при выборе оптимального рациона человека. Однако повышенное поступление ингибиторов в организм приводит к нарушениям работы желудочно-кишечного тракта (тошнота, диарея и рвота) [11, 17].

Фитиновая кислота (фитаты). Фитиновая кислота (мио-инозитол-1,2,3,4,5,6-гексаксидигидрофосфат) – природное соединение, служащее главной формой хранения фосфора в тканях растений. Это вещество обладает сильными хелатирующими свойствами за счет наличия шести фосфатных групп, способных связывать двух- и трехвалентные катионы металлов, – железо, цинк, кальций, марганец, медь и магний. Образование таких комплексов ограничивает биодоступность связанных минеральных веществ из-за образования нерастворимых солей, что снижает усвоение элементов в пищеварительном тракте и может вызвать их дефицит в организме человека. Формирование фитатно-минеральных комплексов зависит от pH, вида элемента, конкурирующих лигандов и ионной связи. Также фитиновая кислота взаимодействует с пищеварительными ферментами, белками и крахмалом, влияя на усвоение питательных веществ в желудочно-кишечном тракте организма. Фитаты (соли фитиновой кислоты) из-за недостаточного количества фитаз в пищеварительном тракте человека и животных с однокамерным желудком не подвергаются расщеплению и всасыванию в кишечнике, хотя данный процесс возможен при воздействии фитазной активности микрофлоры и кислой среды желудка [18, 19].

Фитиновая кислота и ее соли составляют от 50 до 80 % от общего содержания фосфора в растениях. Данные соединения присутствуют преимущественно в семенах и зернах злаковых, бобовых и масличных культур, орехах. При этом особое внимание уделяется зародышу кукурузы, сое, рису, фасоли и арахису. Известно, что в однодольных культурах (пшеница, рис, кукуруза) фитаты накапливаются в алейроновом слое, оболочке или зародыше, что обуславливает частичное удаление при переработке, а в двудольных (бобовые, масличные, орехи) образуют прочную связь с белками и являются трудноотделимыми [20].

Фитиновая кислота обладает сильными антиоксидантными свойствами: уменьшает пероксидное окис-

ление липидов посредством нейтрализации свободных радикалов фосфатными и гидроксильными группами, а также защищает семена от окислительного воздействия благодаря связыванию железа. Связывание крахмала и снижение его усвояемости фитиновой кислотой могут быть полезны для контролирования уровня глюкозы в крови для людей, страдающих сахарным диабетом. Также это соединение обладает противовоспалительными и антиканцерогенными свойствами, снижающими риск возникновения и развития рака толстой кишки и обострения кишечных заболеваний. Фитиновая кислота благоприятно влияет на сердечно-сосудистую систему за счет снижения уровня холестерина и триглицеридов в сыворотке крови, что предотвращает гиперхолестеринемия и атеросклероз. По мнению некоторых международных организаций, отрицательное воздействие фитиновой кислоты на организм человека можно нивелировать при соблюдении ее безопасной суточной дозы, составляющей не более 25 мг на 100 г пищи [11, 21].

Лектины. Лектинами называют вещества белковой природы, вызывающие агглютинацию клеток благодаря высокоизбирательному связыванию углеводных остатков на их поверхности. В отсутствие известной специфичности к сахарам их также именуют гемагглютинидами. Данные антинутриенты в зависимости от количества и структурного расположения доменов, связывающих углеводные фрагменты, подразделяются на меролектины, гололектины, химеролектины и суперлектины [22].

Гемагглютинины, присоединяясь к моно- или олигосахаридам на поверхности эритроцитов и вызывая их агрегацию, нарушают транспортировку кислорода и распределение питательных веществ в организме человека. Лектины ухудшают всасывание и усвоение питательных нутриентов через связывание с гликозилированными рецепторами на эпителиальных клетках кишечника, что ведет к нарушению целостности эпителия и повышению проницаемости кишечника, а также к развитию воспалительных процессов. Кроме того, данные антипитательные соединения могут подавлять активность пищеварительных ферментов и, как следствие, вызывать расстройство метаболизма белков и углеводов. Результатом связывания углеводов лектинами для организма человека становятся различные нарушения и заболевания: ожирение, хронические воспаления, аутоиммунные реакции и расстройства желудочно-кишечного тракта [9, 23].

Основные источники лектинов растительного происхождения – представители бобовых (фасоль, соя, чечевица, горох и арахис), среди цельнозерновых культур – пшеница, а также некоторые овощи, в частности помидоры, картофель и баклажаны. Количественное содержание лектинов в зернобобовых, например сое, чечевице и фасоли, по данным некоторых исследований, составляет 4,8; 8,0 и 0,7 – 25,3 г/кг соответственно. Наивысшее содержание данных углеводовсвязывающих

белков отмечено в красной фасоли, причем употребление в пищу сырых или недостаточно термически обработанных бобов может привести к серьезным токсическим реакциям организма – тошноте, диарее, рвоте и другим нарушениям пищеварительного тракта. Лектины относятся к термолабильным соединениям, поэтому в процессе приготовления при достаточной термической обработке они утрачивают свою активность. Фасоль содержит фитогемагглютинин – белок-лектин, состоящий из двух субъединиц, обеспечивающих агглютинацию лейкоцитов и эритроцитов посредством специфического связывания сложных олигосахаридов [24].

Несмотря на антипитательные свойства лектинов, ряд исследований свидетельствует об их терапевтической пользе при лечении онкологических заболеваний вследствие проявления потенциальной антиангиогенной, антиметастатической и антипролиферативной активностей как *in vitro*, так и *in vivo*. Многие лектины способны избирательно связываться с мембранами раковых клеток или их рецепторами, вызывая цитотоксичность, апоптоз и предотвращение развития опухоли. Таким образом, данные антинутриенты обладают терапевтическим потенциалом для организма человека при соблюдении соответствующих ограничений в дозировке и способе введения [23, 25].

Сапонины. Сапонины – сложные соединения растительного происхождения, обладающие поверхностно-активными свойствами. Они состоят из двух частей: липофильного тритерпенового или стероидного агликона и связанного с ним одного или нескольких гидрофильных углеводных компонентов (моно- или олигосахаридов). Стероидные сапонины включают 27 атомов углерода, а тритерпеновые молекулы – 30 углеродных атомов. Сочетание в одной молекуле липофильного и гидрофильного фрагментов обуславливает поверхностно-активные свойства сапонинов [26].

Данные соединения относят к антипитательным факторам продуктов растительного происхождения из-за отрицательного влияния на биодоступность питательных веществ в организме человека. Сапонины способны препятствовать усвоению жирорастворимых витаминов путем образования нерастворимых комплексов со стеролами в пищеварительном тракте, а также ингибирования активности ферментов, нарушая метаболизм липидов, углеводов и белков. Помимо этого, сапонины оказывают хелатирующее действие на такие микроэлементы, как железо и цинк, что приводит к снижению их всасывания в кишечнике и создает риск развития анемии и дефицита минеральных веществ для живого организма. Эти антинутриенты проявляют гемолитическую активность посредством взаимодействия с холестерином мембран эритроцитов, вызывая при этом их разрушение. Сапонины практически не гидролизуются под действием пищеварительных ферментов человека, а связываются с клетками тонкого кишечника, что приводит к нарушению целостности

и проницаемости эпителиального слоя и появлению токсических эффектов для организма. Особенно указанные негативные воздействия проявляются при попадании соединений в организм в высоких концентрациях [9, 15, 27].

Сапонины содержатся в корнях, листьях, плодах, цветках, околоплодниках и семенах многочисленных семейств растений – как культурных, так и дикорастущих. Основными источниками тритерпеновых сапонинов служат зернобобовые (соя, фасоль, горох, нут, арахис, чечевица), а также их высокие концентрации обнаружены в семенах подсолнечника и киноа, листьях чая, сахарной свеклы и шпината, люпине, женьшене и луке. Стероидные сапонины присутствуют в овсе, спарже, пажитнике, юкке, баклажанах, томатах и батате, их содержание в киноа и амаранте составляет 0,63–69,30 и 0,09–0,49 мг/100 г сухого вещества (СВ) соответственно, их количество варьируется в бобах фасоли, нута и красной чечевицы – 30–585, 150–843 и 370–714 мг/100 г СВ соответственно [2, 20, 28].

Имеются данные о значительном разнообразии биологической активности сапонинов: об их антиоксидантных, антиканцерогенных, противовирусных, противовоспалительных свойствах и гепатопротекторных и кардиопротекторных эффектах. Некоторые сапонины могут использоваться для предотвращения или замедления развития онкологических заболеваний, включая рак молочной железы, легких, толстой кишки и других видов, благодаря способности вызывать апоптоз раковых клеток и подавлять их пролиферации. Отдельные сапонины выступают в качестве иммуностимуляторов: активируют иммунные клетки и усиливают иммунный ответ организма на инфекции. Эти соединения снижают уровень холестерина в крови посредством образования с ним нерастворимых комплексов, что благотворно влияет на сердечно-сосудистую систему, а также проявляют противомикробный эффект в отношении различных патогенов, разрушая мембраны микробных клеток. Наличие поверхностно-активных свойств сапонинов (пенообразования, снижения поверхностного натяжения, мицеллообразования, очистки, смачивания, стабилизации, эмульгирования, солубилизации и др.) обеспечивает их широкое применение в различных областях, в т. ч. косметической, фармацевтической и пищевой промышленности [27, 29].

Танины. Танины – соединения растительного происхождения, относящиеся к группе полифенолов и обладающие дубильными свойствами с соответствующим вяжущим вкусом. Они подразделяются на два основных класса: гидролизуемые и конденсированные. По химической структуре гидролизуемые дубильные вещества содержат полиольное ядро углевода (обычно глюкозы), частично или полностью этерифицированной фенольными кислотами (галловой или эллаговой). Молекулярная масса этих соединений варьируется в пределах 500–3000 Да, их сложноэфирные связи достаточно легко подвергаются кис-

лотному, щелочному или ферментативному гидролизу. Конденсированные танины (проантоцианидины) – наиболее распространенная группа природных танинов. Это полимеры флаван-3-ольных звеньев (например катехина, эпикатехина), связанных углерод-углеродными связями, что обуславливает их устойчивость к гидролизу. Данные соединения имеют молекулярную массу 1000–20 000 Да. Благодаря полифенольной природе с большим количеством гидроксильных групп танины взаимодействуют с белками, полисахаридами и некоторыми минералами [30, 31].

Антипитательная активность танинов проявляется в их способности образовывать прочные комплексы с полисахаридами и, особенно, с белками. Гидрофобные взаимодействия и водородные связи приводят к формированию агрегатов и осадков. В результате снижается усвоение и всасывание макронутриентов в организме человека и животного. При потреблении продуктов с высокой концентрацией танинов во рту происходит взаимодействие с белками слюны и их осаждение. Таким образом, танины нарушают смазывающие свойства белков, богатых пролином, что усиливает вяжущий, терпкий вкус пищи. Кроме того, дубильные вещества отрицательно влияют на переваривание белков, крахмала и липидов за счет ингибирующего воздействия на активность пищеварительных ферментов, в частности, протеаз, амилазы и липазы. Эти антинутриенты препятствуют усвоению элементов (железо, кальций, цинк) посредством образования дубильно-минеральных комплексов, повышающих риск развития железодефицитной анемии и остеопороза. Согласно исследованиям, чрезмерное потребление танинов вызывает понижение уровня гемоглобина и активности трансферрина в крови, что также свидетельствует о нарушении всасывания минеральных веществ [9, 32, 33].

К достоинствам танинов относится их сильная антиоксидантная активность, которая способствует эффективной нейтрализации свободных радикалов и препятствует пероксидному окислению липидов. В некоторых исследованиях отмечаются противораковые, противовирусные, кардиопротекторные и антимикробные свойства дубильных веществ. Они могут быть полезны в качестве пребиотиков для микроорганизмов кишечника, создавая условия для роста полезных кишечных бактерий или активации их метаболических функций. Имеются сведения о потенциале танинов в терапевтических целях, в частности при снижении риска сердечно-сосудистых заболеваний, а также в регулировании и контроле уровня глюкозы в крови при сахарном диабете [11, 31].

Основными источниками танинов являются напитки (чай, кофе, вино, фруктовые соки), ягоды (гранат, клубника, черника, клюква), орехи (желудь, фундук, миндаль, грецкий орех, пекан, арахис), фрукты (виноград, хурма, айва, яблоки, груши, сливы), травы и специи (гвоздика, корица, тимьян, тмин, ваниль, эстрагон),

а также бобовые культуры. Дубильные вещества присутствуют в листьях, плодах, коре и древесине различных растений: дуб, какао, каштан, черемуха, гранатовое дерево, хурма и др. По различным данным, количественное содержание танинов в побочных продуктах производства чая составляет 5–8 г/100 г СВ. В зависимости от предварительной очистки семян и сорта растений количество конденсированных танинов в бобовых культурах может значительно варьироваться, например в бобах (*Vicia faba* L.) – от 10,9

до 195,0 мг/100 г СВ, нуте – от 21,5 до 175,2 мг/100 г СВ, красной чечевице – от 19,9 до 582,0 мг/100 г СВ [2, 9, 31]. Таким образом, антипитательные вещества обладают двойной функцией (рис.).

Способы снижения антипитательных факторов.

Существуют различные способы обработки растительных культур и продуктов для уменьшения антипитательных веществ до безопасного уровня. К наиболее распространенным традиционным методам относятся замачивание, проращивание, ферментация и различные

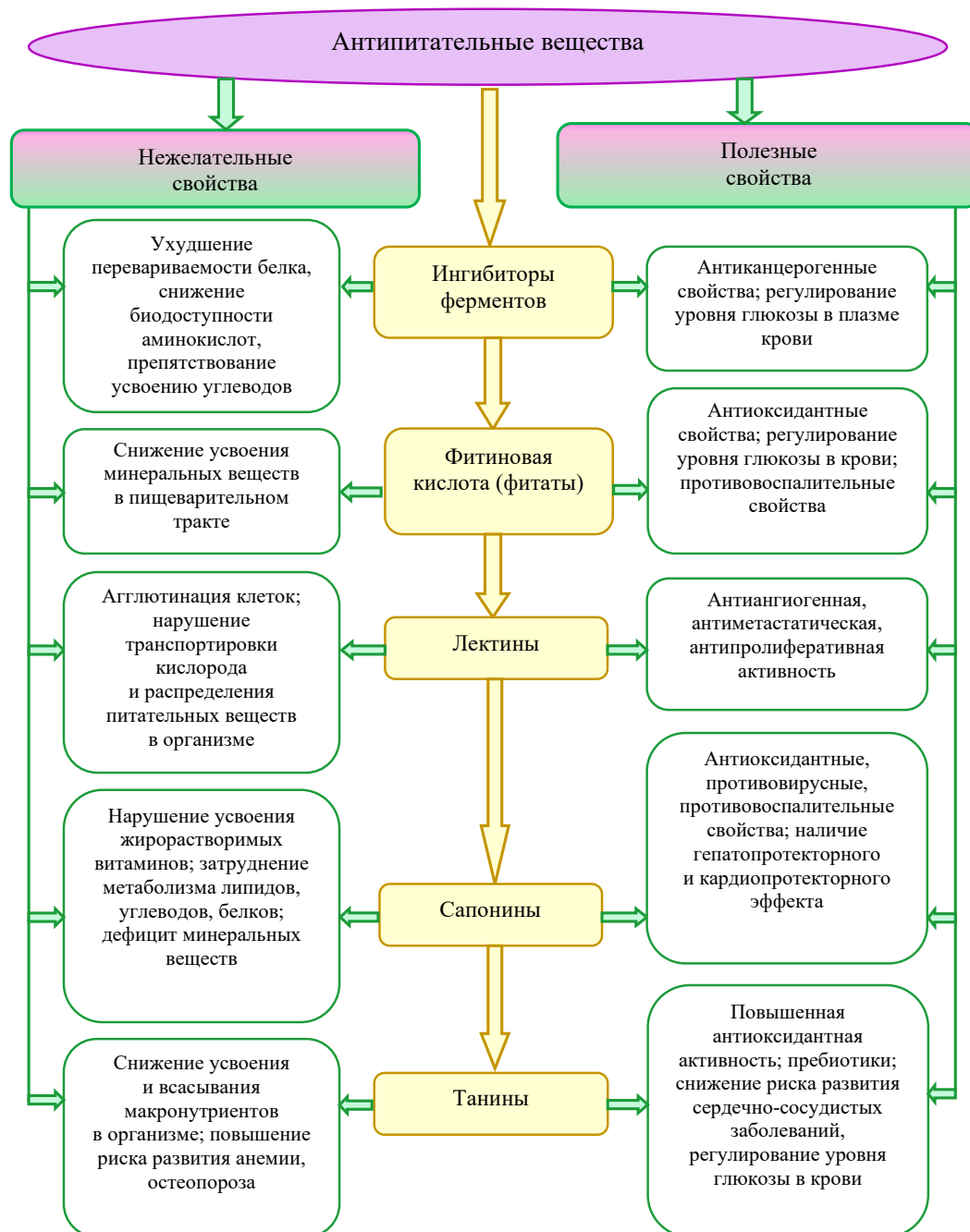


Рисунок. Нежелательные и полезные свойства антинутриентов

Figure. Undesirable and beneficial properties of anti-nutritional substances

виды термической обработки, а также их совместное применение. Современные исследования подтверждают эффективность новых подходов к снижению содержания антинутриентов в растительном сырье: экструзия, ультразвуковая и микроволновая обработка, воздействие высоким гидростатическим давлением и импульсным электрическим полем.

Замачивание. Этот способ позволяет снизить концентрацию антипитательных веществ за счет их перехода в раствор. В процессе замачивания происходит набухание сырья и активация эндогенных ферментов, например фитазы, способствующей расщеплению фитатов. Эффективность указанного процесса зависит от ряда факторов: продолжительности, типа используемой среды (вода, солевые растворы), температуры и pH. Важным фактором является соотношение воды и сырьевого объекта, т. к. при низком соотношении результативность снижается из-за медленной диффузии воды и скорости растворения, а при высоком – увеличивается энергоёмкость процесса [9].

Исследовано влияние замачивания и варки на содержание антипитательных соединений, в частности танинов и фитатов, в красной, белой и черной фасоли. Образцы фасоли обрабатывали в дистиллированной воде в течение 16 ч с последующей сушкой в естественных условиях. Варку предварительно замоченных бобов осуществляли 1 ч. Установлено снижение фитатов и танинов на 12–16 и 23–30 % при замачивании и на 37–38 и 21–41 % при варке [34]. Проведен анализ содержания дубильных веществ в малораспространенных представителях бобовых до и после замачивания в течение 24 ч при уровнях гидратации от 0 до 100 %. Зафиксировано максимальное снижение концентрации танинов на 15,5 % [33]. Набухание в дистиллированной воде в соотношении 1:5 24 ч с последующей сушкой в печи при 40 °С в лимской фасоли (*Phaseolus lunatus* L.) и фасоли адзуки (*Vigna angularis* L.) позволило снизить содержание фитатов, танинов и активность ингибиторов трипсина: в лимской фасоли показатели уменьшились на 11,8; 15,4 и 35,7 % соответственно, в фасоли адзуки – на 25,0; 4,2 и 28,4 % соответственно [35]. Замачивание и проращивание используются в качестве промежуточных этапов обработки продовольственных культур, но для более полного устранения антипитательных факторов рекомендуются комбинации с другими методами [36].

Проращивание. Проращивание считается эффективным методом снижения уровня антинутриентов в продуктах растительного происхождения. В ходе прорастания активируются собственные ферменты (фитазы, пероксидазы, полифенолоксидазы и протеазы), способствующие расщеплению фитатов, окислению фенольных соединений и гидролизу белков. Отмечается, что в пророщенных зернах повышается биодоступность и усвояемость минералов и других питательных веществ. Степень уменьшения концентрации антипитательных соединений при проращивании

зависит от вида сырья, типа антинутриента и условий процесса (температуры, продолжительности и воздействия света) [37, 38].

Проведены исследования влияния проращивания в течение 24 и 48 ч на содержание антипитательных соединений в нуте, чечевице, горохе и маше. Обнаружено, что с увеличением длительности снижается количество фитиновой кислоты и активность ингибиторов трипсина в исследуемых бобовых: на 10,7–75,7 и 4,7–39,2 % соответственно после 48 ч проращивания. Содержание танинов в чечевице уменьшилось в 2,6 раза, в маше – в 5,8 раза, а в горохе повысилось в 1,6 раза, при этом уровень сапонинов значительно увеличился во всех образцах, что может указывать на их концентрирование в большей степени в проростках [39]. Также отмечено снижение концентрации танинов в двух сортах чечевицы в 3,4–4,1 раза после проращивания в течение 8 суток [40]. Зафиксировано эффективное уменьшение танинов и фитиновой кислоты на 27,1–59,9 и 17,4–47,6 % соответственно в замоченных и пророщенных в течение 72 ч образцах амаранта, киноа и гречихи, вместе с тем выявлено повышение содержания в зернах белка, клетчатки, минеральных веществ и антиоксидантной активности [41]. Кроме того, установлено уменьшение содержания фитиновой кислоты в трех сортах киноа и рост фитазной активности через 7 суток после проращивания [42].

Ферментация. Одним из самых распространенных и основных методов, способствующих устранению или минимизации содержания антинутриентов в растительных продуктах, является ферментация. Этот процесс влияет на биохимический состав посредством расщепления микроорганизмами макронутриентов на более простые и биодоступные формы, что повышает усвояемость питательных веществ и пищевую ценность продуктов. Применение метода ферментации позволяет создавать благоприятные условия pH для ферментативного гидролиза антипитательных соединений. Микроорганизмы способны продуцировать фитазы, протеазы, эстеразы и другие ферменты, гидролизующие антинутриенты [36, 43].

Твердофазная ферментация с использованием *Pleurotus ostreatus* в отношении предварительно стерилизованных нута, чечевицы и соевых бобов позволила снизить содержание танинов и фитатов на 25,7–28,8 и 16,0–18,8 % соответственно, а также повысить усвояемость белка и антиоксидантную активность обработанных культур [44]. Анализ влияния ферментации под действием *Lactiplantibacillus plantarum*, ультразвуковой обработки и бланширования на антинутриенты томатов показал эффективность всех перечисленных способов. При этом применение молочнокислых бактерий способствовало наибольшему снижению концентраций антипитательных соединений, в т. ч. фитатов – на 95,8 %, сапонинов – на 89 % [45]. Отмечено значительное снижение антинутриентов на 66–95 % при ферментации шпината с использованием *L. plantarum* [46].

Ферментация молочнокислыми бактериями корма из кукурузной и глютенной муки, а также теста из проса и кукурузы для приготовления эфиопской ферментированной лепешки позволила сократить концентрации фитатов в образцах на 48 и 98 % соответственно [47, 48].

Термическая обработка и ее разновидности.

Существуют различные виды термической обработки растительных продуктов: варка, запекание, автоклавирование, экструзионный нагрев и микроволновая обработка. Эти методы в большей степени влияют на термически нестабильные антинутриенты, такие как ингибиторы ферментов и лектины. Недостатком таких приемов, несмотря на их эффективность и скорость, остается возможное разрушение ценных соединений сырья (например термолабильных витаминов и аминокислот), поэтому необходимо соблюдать оптимальные условия процесса (температурный режим, продолжительность). Автоклавирование – высокоинтенсивный метод обработки с использованием высокой температуры и давления в течение короткого времени. Данный процесс протекает в автоклаве, в которой обрабатываемый объект подвергают воздействию насыщенного пара под давлением 100–200 кПа при температуре 115–130 °С. Экструзионная варка – кратковременный термомеханический способ обработки, сочетающий воздействие температуры, давления и механического сдвига, создаваемый в экструдере. При выходе модифицированного материала из сопла экструдера давление падает, что вызывает эффект вспучивания и влияет на текстуру и состав продукта [49, 50].

При исследовании влияния различных способов обработки на антинутриенты фасоли выявлено, что при замачивании в течение 6 ч и последующем автоклавировании 30 мин при 121 °С достигнуто наибольшее снижение в бобах ингибиторов трипсина (на 96,5 %), гемаггютина (на 74,1 %), фитатов (на 71,6 %) и танинов (на 51,4 %). Обработка в микроволновой печи, ферментация и замачивание совместно с кипячением способствовали уменьшению концентраций указанных антипитательных соединений и повышению усвояемости белка фасоли [51]. Обнаружено, что в процессе автоклавирования в течение 15–20 мин активность ингибиторов трипсина в бобовых культурах снижается на 70–85 %, а при последующей ферментации молочнокислыми бактериями данный показатель увеличивается до 90–95 %. Также сообщается об устранении более 95 % лектинов при кипячении 30 мин чечевицы и черных бобов [36]. Несколько сортов чечевицы были подвержены различным видам обработки для устранения антипитательных факторов, в результате чего наибольшее снижение концентраций ингибиторов трипсина и танинов получено при варке продолжительностью 35 мин предварительно замоченных образцов, а проращивание в большей степени оказало влияние на фитиновую кислоту [52]. При экструдировании двух сортов чечевицы в течение 10–15 с при давлении 3 МПа было достигнуто умень-

шение содержащихся танинов в 1,7–2,5 раза [40]. Сообщается о снижении активности ингибиторов трипсина на 87–96 % в экструдированных продуктах различного рецептурного состава на основе риса и нута по сравнению с необработанными образцами. Экструзию проводили с помощью двухшнекового экструдера при температуре 140 °С 10 мин при скорости вращения шнека 500 об/мин [53]. Экструзионная обработка композитной муки при 130 °С и вращении шнека 150 об/мин привела к уменьшению концентрации фитатов и танинов в полученных образцах [54].

В основе микроволновой обработки лежит объемное термическое воздействие, которое нарушает клеточные мембраны и увеличивает скорость массообмена. Ключевыми параметрами микроволнового нагрева являются уровень мощности и продолжительность обработки. Преимущества данного способа включают высокую скорость нагрева, сокращение времени приготовления, практичность и экономичность обслуживания [55]. При воздействии микроволнового излучения мощностью 500 Вт на протяжении 5 мин на различные сорта фасоли достигнуто снижение концентраций фитатов, танинов и сапонинов на 16–25, 34–40 и 35–42 %, соответственно, причем комбинация с предварительным замачиванием усилила этот эффект [56]. После обработки картофеля микроволнами мощностью 1,1 кВт в течение 2 мин и бланширования при 100 °С содержание антинутриентов снизилось на 76–84 % [57]. Исследовано влияние СВЧ-обработки на активность ингибиторов трипсина и содержание фитиновой кислоты в изоляте горохового белка, а также гидролизатов чечевицы и гороха, результаты показали снижение концентраций данных антипитательных соединений на 43–62 и 30–80 % соответственно [58].

Современные и перспективные методы обработки продуктов. В настоящее время особое внимание заслуживают новые технологии, способные эффективно воздействовать на антинутриенты растительных продуктов посредством молекулярных модификаций, сохраняя при этом безопасность сырья. Ультразвуковое воздействие на пищевые продукты осуществляется с помощью высокочастотных звуковых волн или акустической энергии, влияющих на нековалентные связи макромолекул. Ультразвук в жидкой среде способствует быстрому образованию и схлопыванию кавитационных пузырьков, вызывая колебания температуры, давления и высвобождение энергии. Возникающие сдвиговые усилия могут изменять молекулярную структуру белков и индуцировать гидролитическую активность, при этом отмечается, что ультразвуковая обработка сохраняет питательную ценность продуктов. Обработка высоким гидростатическим давлением (ВГД) – новая технология, воздействующая на межмолекулярные и внутримолекулярные связи в белках и углеводах, что способствует инактивации или снижению концентраций некоторых антипитательных

соединений. ВГД обычно применяют в диапазоне 300–600 МПа непосредственно или через жидкую среду. Обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) – инновационная технология, представляющая собой воздействие короткими и мощными импульсами высокого напряжения (до 80 кВ/см) на образцы продуктов, помещенных между двумя электродами. Данный метод основан на эффекте электропорации, при котором электрическое поле повышает проницаемость мембран клеток растительных тканей, что может влиять на активность и количество антипитательных компонентов [37, 59].

В исследовании влияния предварительной обработки (в т. ч. ультразвуком частотой 37 кГц в течение 30 мин) на проращивание гречихи и киноа обнаружено, что содержание фитиновой кислоты уменьшилось на 85,5 % в пророщенной киноа при применении ультразвука [60]. Ультразвуковая обработка с частотой 20 кГц и продолжительностью 26 мин при гидратации проса снизила содержание фитатов и танинов в образцах на 67 и 63 % соответственно [61]. Применение ВГД при 200–400 МПа и ультразвука частотой 20 кГц при экстракции горохового белка способствовало снижению концентраций антинутриентов, при этом в предварительно обработанном ВГД горохе активность ингибиторов трипсина снизилась на 33,5 %, танинов – на 49,8 % [62]. При обработке гороха и фасоли ВГД при 600 МПа было достигнуто уменьшение содержания фитиновой кислоты на 36 и 11 % и повышение усвояемости белка на 4,3 и 8,7 % соответственно, трипсинингибирующая активность в образцах была практически полностью устранена при совместном воздействии давления и повышенной температуры [59]. Сообщается о снижении содержания ингибиторов трипсина на 75,6 % в соевом молоке при воздействии ИЭП при напряжении 40 кВ/см и длительности импульса 2250 мс [9]. Предварительная обработка низкоинтенсивным ИЭП привела к уменьшению концентрации фитиновой кислоты в проросших бобах (*Vicia faba* L.) на 20,4 % [63]. Применение инновационных методов для инактивации антипитательных соединений продуктов растительного происхождения требует дальнейших комплексных исследований.

Выводы

Проведенный анализ зарубежной и отечественной научной литературы показывает, что антипитательные соединения, такие как ингибиторы ферментов, фитаты, лектины, танины и сапонины являются неотъемлемыми

компонентами растительного сырья, оказывающими значительное влияние на пищевую ценность продуктов, преимущественно снижая биодоступность макро- и микроэлементов.

Вместе с тем, современные исследования указывают на потенциальное положительное физиологическое воздействие антинутриентов (антиоксидантное, антиканцерогенное, гипогликемическое) при их контролируемом потреблении, что подтверждает необходимость дифференциального подхода к оценке этих веществ.

Наиболее эффективными и широко применяемыми способами снижения содержания антипитательных факторов остаются традиционные методы, включающие замачивание, проращивание, ферментацию и термическую обработку (особенно автоклавирование). Их комбинирование позволяет добиться синергетического эффекта. Перспективными направлениями выступают инновационные технологии обработки – ультразвуковая, обработка высоким гидростатическим давлением и импульсным электрическим полем. Эти методы способствуют не только эффективной инактивации антинутриентов, но и минимизации потерь термочувствительных питательных веществ.

Таким образом, оптимизация пищевой ценности растительных продуктов должна базироваться на научно обоснованном выборе и комбинации приемов обработки, учитывающих специфику сырья, тип антипитательных соединений и необходимость сохранения биологически активных компонентов. Необходимы дальнейшие комплексные исследования, направленные на изучение молекулярных механизмов модификации антинутриентов при обработке, а также на оценку влияния полученных продуктов на здоровье человека.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The authors contributed equally to the research and share first authorship.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Боков Д. О., Богачук М. Н., Малинкин А. Д., Назарова В. А., Бессонов В. В. Оценка взаимодействия полисахаридов и минорных биологически активных веществ в функциональных пищевых ингредиентах растительного происхождения. Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 1. С. 108–115. [Bokov DO, Bogachuk MN, Malinkin AD, Nazarova VA, Bessonov VV. Interaction assessment of polysaccharides and minor bioactive compounds in functional food ingredients of plant origin. Problems of Nutrition. 2023;92(1):108–115. (In Russ.)] <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-108-115>

2. Han R, Wang Y, Yang Z, Micklethwaite S, Mondor M, *et al*. Industrial-scale fractionation of fava bean, chickpea, and red lentil: A comparative analysis of composition, antinutrients, nutrition, structure, and functionality. *Current Research in Food Science*. 2025;11:101152. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101152>
3. Affrifah NS, Uebersax MA, Amin S. Nutritional significance, value-added applications, and consumer perceptions of food legumes: A review. *Legume Science*. 2023;5(4):e192. <https://doi.org/10.1002/leg3.192>
4. Didinger C, Thompson HJ. The role of pulses in improving human health: A review. *Legume Science*. 2022;4(4):e147. <https://doi.org/10.1002/leg3.147>
5. Samtiya M, Aluko RE, Dhewa T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: An overview. *Food Production, Processing and Nutrition*. 2020;2:6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>
6. Костюченко М. Н., Тагиев Н. Ш., Савкина О. А. Пищевая ценность и антипитательные факторы цельнозерновых ингредиентов для производства хлебобулочных изделий. *Хлебопродукты*. 2023. № 7. С. 36–40. [Kostyuchenko MN, Tagiev NSH, Savkina OA. Nutritional value and anti-nutritional factors of whole grain ingredients for the production in bakery products. *Bakery Products*. 2023;(7):36–40. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2023-32-7-36-40>
7. Acquah C, Ohemeng-Boahen G, Power KA, Tosh SM. The effect of processing on bioactive compounds and nutritional qualities of pulses in meeting the sustainable development goal 2. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021;5:681662. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.681662>
8. Ахангаран М., Афанасьев Д. А., Чернуха И. М., Машенцева Н. Г., Гаравири М. Биоактивные пептиды и антипитательные вещества нута: характеристика и свойства (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022. Т. 183. № 1. С. 214–223. [Akhangan M, Afanas'ev DA, Chernukha IM, Mashentseva NG, Garaviri M. Bioactive peptides and antinutrients in chickpea: description and properties (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(1):214–223. (In Russ.)] <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-1-214-223>
9. Kheto A, Choudhury DB, Sarkhel S, Sarkar A, Kumar Y. Anti-nutritional factors: Nutrient interactions, processing interventions, and health aspects. *Food Chemistry*. 2025;496:146746. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146746>
10. Das G, Sharma A, Sarkar PK. Conventional and emerging processing techniques for the post-harvest reduction of antinutrients in edible legumes. *Applied Food Research*. 2022;2(1):100112. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100112>
11. Salim R, Nehvi IB, Mir RA, Tyagi A, Ali S, *et al*. A review on anti-nutritional factors: Unraveling the natural gateways to human health. *Frontiers in Nutrition*. 2023;10:1215873. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1215873>
12. Manzanilla-Valdez ML, Ma Z, Mondor M, Hernández-Álvarez AJ. Decoding the duality of antinutrients: Assessing the impact of protein extraction methods on plant-based protein sources. *Journal of agricultural and food Chemistry*. 2024;72(22):12319–12339. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00380>
13. Luo Z, Zhu Y, Xiang H, Wang Z, Jiang Z, *et al*. Guo Advancements in inactivation of soybean trypsin inhibitors. *Foods*. 2025;14(6):975. <https://doi.org/10.3390/foods14060975>
14. Shi L, Mu K, Arntfield SD, Nickerson MT. Changes in levels of enzyme inhibitors during soaking and cooking for pulses available in Canada. *Journal of Food Science and Technology*. 2017;54(4):1014–1022. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2519-6>
15. Nath H, Samtiya M, Dhewa T. Beneficial attributes and adverse effects of major plant-based foods anti-nutrients on health: A review. *Human Nutrition & Metabolism*. 2022;28:200147. <https://doi.org/10.1016/j.hnm.2022.200147>
16. Cheng S, Langrish TAG. A review of the treatments to reduce anti-nutritional factors and fluidized bed drying of pulses. *Foods*. 2025;14(4):681. <https://doi.org/10.3390/foods14040681>
17. Lin Q, Qiu C, Li X, Sang S, McClements DJ, *et al*. The inhibitory mechanism of amylase inhibitors and research progress in nanoparticle-based inhibitors. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022;63(33):12126–12135. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2098687>
18. Brouns F. Phytic acid and whole grains for health controversy. *Nutrients*. 2021;14(1):25. <https://doi.org/10.3390/nu14010025>
19. Chondrou T, Adamidi N, Lygouras D, Hirota SA, Androutsos O, *et al*. Dietary phytic acid, dephytinization, and phytase supplementation alter trace element bioavailability—a narrative review of human interventions. *Nutrients*. 2024;16(23):4069. <https://doi.org/10.3390/nu16234069>
20. Singh P, Pandey VK, Sultan Z, Singh R, Dar AH. Classification, benefits, and applications of various anti-nutritional factors present in edible crops. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023;14:100902. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100902>
21. Feizollahi E, Mirmahdi RS, Zoghi A, Zijlstra RT, Roopesh MS, *et al*. Review of the beneficial and anti-nutritional qualities of phytic acid, and procedures for removing it from food products. *Food Research International*. 2021;143:110284. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110284>
22. Naithani S, Komath SS, Nonomura A, Govindjee G. Plant lectins and their many roles: Carbohydrate-binding and beyond. *Journal of Plant Physiology*. 2021;266:153531. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153531>
23. López-Moreno M, Garcés-Rimón M, Miguel M. Antinutrients: Lectins, goitrogens, phytates and oxalates, friends or foe? *Journal of Functional Foods*. 2022;89:104938. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.104938>

24. Duraiswamy A, Sneha A NM, Jebakani K S, Selvaraj S, Pramitha J L, *et al.* Genetic manipulation of anti-nutritional factors in major crops for a sustainable diet in future. *Frontiers in Plant Science*. 2023;13:1070398. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1070398>
25. Mazalovska M, Kouokam JC. Plant-derived lectins as potential cancer therapeutics and diagnostic tools. *BioMed Research International*. 2020;2020:1631394. <https://doi.org/10.1155/2020/1631394>
26. Timilsena YP, Phosanam A, Stockmann R. Perspectives on saponins: Food functionality and applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(17):13538. <https://doi.org/10.3390/ijms241713538>
27. Sharma K, Kaur R, Kumar S, Saini RK, Sharma S, *et al.* Saponins: A concise review on food related aspects, applications and health implications. *Food Chemistry Advances*. 2023;2:100191. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100191>
28. Jan N, Hussain SZ, Naseer B, Bhat TA. Amaranth and quinoa as potential nutraceuticals: A review of anti-nutritional factors, health benefits and their applications in food, medicinal and cosmetic sectors. *Food Chemistry: X*. 2023;18:100687. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100687>
29. White CS, Dilger RN. Immunomodulatory potential of dietary soybean-derived saponins. *Journal of Animal Science*. 2024;102:349. <https://doi.org/10.1093/jas/skae349>
30. Melo LFM, Aquino-Martins VGQ, Silva APD, Oliveira Rocha HA, Scortecchi KC. Biological and pharmacological aspects of tannins and potential biotechnological applications. *Food Chemistry*. 2023;414:135645. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135645>
31. Cosme F, Aires A, Pinto T, Oliveira I, Vilela A, *et al.* A comprehensive review of bioactive tannins in foods and beverages: functional properties, health benefits, and sensory qualities. *Molecules*. 2025;30(4):800. <https://doi.org/10.3390/molecules30040800>
32. Molino S, Pilar Francino M, Rufián Henares MÁ. Why is it important to understand the nature and chemistry of tannins to exploit their potential as nutraceuticals? *Food Research International*. 2023;173:113329. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113329>
33. Ojo MA. Tannins in foods: nutritional implications and processing effects of hydrothermal techniques on underutilized hard-to-cook legume seeds—a review. *Preventive Nutrition and Food Science*. 2022;27(1):14–19. <https://doi.org/10.3746/pnf.2022.27.1.14>
34. Abera S, Yohannes W, Chandravanshi BS. Effect of processing methods on antinutritional factors (oxalate, phytate, and tannin) and their interaction with minerals (calcium, iron, and zinc) in red, white, and black kidney beans. *International Journal of Analytical Chemistry*. 2023;2023:6762027. <https://doi.org/10.1155/2023/6762027>
35. Rizvi QUEH, Guiné RPF, Ahmed N, Sheikh MA, Sharma P, *et al.* Kumar Effects of soaking and germination treatments on the nutritional, anti-nutritional, and bioactive characteristics of adzuki beans (*Vigna angularis* L.) and lima beans (*Phaseolus lunatus* L.). *Foods*. 2024;13(9):1422. <https://doi.org/10.3390/foods13091422>
36. Ким А. А., Баланов П. Е., Смотряева И. В. Влияние ферментации бобовых на снижение антипитательного фактора. Обзор. Пищевые системы. 2025. Т. 8. № 3. С. 401–406. [Kim AA, Balanov PE, Smotraeva IV. Effect of legume fermentation on the reduction of the anti-nutritional factor. Review. *Food Systems*. 2025;8(3):401–406. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-401-406>
37. Das R, Islam M, Mahajan P, Kaur R, Gaur S, *et al.* Emerging non-thermal technologies for reducing anti-nutritional factors in food systems: A systematic review. *Journal of Food Science*. 2025;90(12):e70781. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70781>
38. Антипова Л. В., Ибрагимова О. Т., Плотников В. Е., Плотникова И. В. Изменение химического состава высокобелковых бобовых культур при проращивании и технологические возможности их применения в функциональных пищевых системах. Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 56–65. [Antipova LV, Ibragimova OT, Plotnikov VE, Plotnikova IV. Changes in the chemical composition of high-protein legumes during germination and technological possibilities of their application in functional food systems. *Proceedings of VSUET*. 2025;87(3):56–65. (In Russ.)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-56-65>
39. Yılmaz Tuncel N, Polat Kaya H, Sakarya FB, Andaç AE, Korkmaz F, *et al.* The effect of germination on antinutritional components, in vitro starch and protein digestibility, content, and bioaccessibility of phenolics and antioxidants of some pulses. *Food Science & Nutrition*. 2025;13(5):e70103. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70103>
40. Плотников В. Е., Магомедов М. Г., Суханов П. Т., Плотникова И. В., Полянский К. К. и др. Антипитательные факторы зернобобовых культур: качественный и количественный анализ танинов в чечевице и продуктах ее переработки. Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 141–152. [Plotnikov VE, Magomedov MG, Sukhanov PT, Plotnikova IV, Polyanskiy KK, *et al.* Anti-nutritional factors of leguminous crops: Qualitative and quantitative analysis of tannins in lentils and their processed products. *Proceedings of VSUET*. 2025;87(3):141–152. (In Russ.)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-141-152>
41. Thakur P, Kumar K, Ahmed N, Chauhan D, Eain Hyder Rizvi QU, *et al.* Effect of soaking and germination treatments on nutritional, anti-nutritional, and bioactive properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.), quinoa (*Chenopodium quinoa* L.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* L.). *Current Research in Food Science*. 2021;4:917–925. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2021.11.019>

42. Maldonado-Alvarado P, Pavón-Vargas DJ, Abarca-Robles J, Valencia-Chamorro S, Haros CM. Effect of germination on the nutritional properties, phytic acid content, and phytase activity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). Foods. 2023;(2):389. <https://doi.org/10.3390/foods12020389>
43. Emkani M, Oliete B, Saurel R. Effect of lactic acid fermentation on legume protein properties, a review. Fermentation. 2022;8:244. <https://doi.org/10.3390/fermentation8060244>
44. Noori SMA, Hojjati M, Sorourian R. Enhancing nutritional quality and functionality of legumes: Application of solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. Food Science & Nutrition. 2025;13:e70783. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70783>
45. Ayub AR, Waseem M, Ahmad Z, Alshammari JM, Ismail T, et al. Probing the effect of ultrasonication, probiotic lacto-fermentation, and blanching on bioactive compounds, antioxidants activities, and antinutrients of tomato. Food Science & Nutrition. 2025;13:e70970. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70970>
46. Naseem A, Akhtar S, Ismail T, Qamar M, Sattar D. Effect of growth stages and lactic acid fermentation on anti-nutrients and nutritional attributes of spinach (*Spinacia oleracea*). Microorganisms. 2023;11:2343. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092343>
47. Sun X, Ma L, Xuan Y, Liang J. Degradation of anti-nutritional factors in maize gluten feed by fermentation with *Bacillus subtilis*: A focused study on optimizing fermentation conditions. Fermentation. 2024;10:555. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110555>
48. Yehuala TF, Atlabachew M, Aslam MF, Allen L, Griffith H, et al. Fermentation kinetics and changes in levels of antinutrients in pearl millet and pearl millet-maize composite dough recipes used to prepare *Injera*. Science & Nutrition. 2025;13(7):e70598. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70598>
49. Avilés-Gaxiola S, Chuck-Hernández C, Serna SO. Inactivation methods of trypsin inhibitor in legumes: A review. Journal of Food Science. 2018;83(1):17–29. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13985>
50. Pedrosa MM, Guillamón E, Arribas C. Autoclaved and extruded legumes as a source of bioactive phytochemicals: A review. Foods. 2021;10:379. <https://doi.org/10.3390/foods10020379>
51. Arise AK, Malomo SA, Cynthia CI, Aliyu NA, Arise RO. Influence of processing methods on the antinutrients, morphology and *in-vitro* protein digestibility of jack bean. Food Chemistry Advances. 2022;1:100078. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100078>
52. Liberal Â, Fernandes A, Ferreira ICFR, Vivar-Quintana AM, Barros L. Effect of different physical pre-treatments on physicochemical and techno-functional properties, and on the antinutritional factors of lentils (*Lens culinaris* spp). Food Chemistry. 2024;450:139293. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139293>
53. Ciudad-Mulero M, Vega EN, García-Herrera P, Fernández-Tomé S, Pedrosa MM. New gluten-free extruded snack-type products based on rice and chickpea and fortified with passion fruit skin: Extrusion cooking effect on phenolic composition, non-nutritional factors, and antioxidant properties. Molecules. 2025;30(6):1225. <https://doi.org/10.3390/molecules30061225>
54. Duguma HT, Forsido SF, Belachew T, Hense O. Changes in anti-nutritional factors and functional properties of extruded composite flour. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2021;5:713701. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.713701>
55. Badjona A, Bradshaw R, Millman C, Howarth M, Dubey B. Faba bean processing: Thermal and non-thermal processing on chemical, antinutritional factors, and pharmacological properties. Molecules. 2023;28(14):5431. <https://doi.org/10.3390/molecules28145431>
56. Yu S, Zhang Yu, Zhang Y, Zhang CH, Liu X, et al. Water-assisted microwave processing: Rapid detoxification and antioxidant enhancement in colored kidney beans. Foods. 2025;14(20):3557. <https://doi.org/10.3390/foods14203557>
57. Waseem M, Akhtar S, Ismail T, Alsulami T, Qamar M, et al. Effect of thermal and non-thermal processing on Technofunctional, nutritional, safety and sensorial attributes of potato powder. Food Chemistry: X. 2024;24:101896. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101896>
58. Рождественская Л. Н., Чугунова О. В. Разработка технических решений по снижению антипитательных веществ бобового сырья. Индустрия питания. 2025. Т. 10. № 2. С. 33–45. [Rozhdestvenskaya LN, Chugunova OV. Development of technical solutions to reduce anti-nutritional substances in legume raw materials. Food Technology. 2025;10(2):33–45. (In Russ.)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-2-4>
59. Ohanenye IC, Ekezie FC, Sarteshnizi RA, Boachie RT, Emenike CU. Legume seed protein digestibility as influenced by traditional and emerging physical processing technologies. Foods. 2022;11(15):2299. <https://doi.org/10.3390/foods11152299>
60. Altıkardeş E, Güzel N. Impact of germination pre-treatments on buckwheat and Quinoa: Mitigation of anti-nutrient content and enhancement of antioxidant properties. Food Chemistry: X. 2024;21:101182. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101182>
61. Yadav S, Mishra S, Pradhan RC. Ultrasound-assisted hydration of finger millet (*Eleusine Coracana*) and its effects on starch isolates and antinutrients. Ultrasonics sonochemistry. 2021;73:105542. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105542>

62. Dong G, Hu Z, Tang J, Das RS, Sun DW, *et al.* Reducing anti-nutritional factors in pea protein using advanced hydrodynamic cavitation, ultrasonication, and high-pressure processing technologies. *Food Chemistry*. 2025;488:144834. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144834>
63. Johnston C, Leong SY, Teape C, Liesaputra V, Oey I. Low-intensity pulsed electric field processing prior to germination improves *in vitro* digestibility of faba bean (*Vicia faba* L.) flour and its derived products: A case study on legume-enriched wheat bread. *Food Chemistry*. 2024;449:139321. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139321>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Алёхина Надежда Николаевна / Nadezhda N. Alekhina ORCID 0000-0002-3317-9858; eLIBRARY SPIN 3412-6635
Антипова Людмила Васильевна / Ludmila V. Antipova ORCID 0000-0002-1416-0297; eLIBRARY SPIN 7423-3405
Лобанов Владимир Григорьевич / Vladimir G. Lobanov ORCID 0000-0003-2838-3253; eLIBRARY SPIN 8017-9952
Пономарева Елена Ивановна / Elena I. Ponomareva ORCID 0000-0003-2310-2838; eLIBRARY SPIN 5848-5870
Нартова Валерия Николаевна / Valeria N. Nartova ORCID 0009-0007-4589-6428; eLIBRARY SPIN 7847-0403